



Повышение биопотенциала молоди муксуна *Coregonus tikus* сверхслабыми импульсными магнитными полями в условиях рыбоводного хозяйства

DOI: 10.37663/0131-6184-2023-6-127-134 EDN rtvuzn

Селюкова Светлана Александровна – аспирант ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университета» (ТюмГУ), @ seliukovasvet@yandex.ru, Тюмень, Россия;

Пищенко Елена Витальевна – доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры биологии, биоресурсов и аквакультуры, Новосибирский государственный аграрный университет (НГАУ), @ epishenko@ngs.ru, Новосибирск, Россия;

Ефремова Екатерина Владимировна – Кандидат биологических наук, заведующая лабораторией, ООО НПО «Собский рыбоводный завод», @ katerinaef@yandex.ru, Ямало-Ненецкий автономный округ, пос. Харп, Россия;

Мирзабаев Дмитрий Алексеевич – лаборант-исследователь, ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университета» (ТюмГУ), @ dmitriy08m@gmail.com, Тюмень, Россия;

Селюков Александр Германович – доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры зоологии и эволюционной экологии животных, ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» (ТюмГУ), @ ags-bios@yandex.ru, Тюмень, Россия

Адреса:

1. ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» – 625003, г. Тюмень ул. Володарского, 6
2. ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет» – 630039, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160
3. ООО НПО «Собский рыбоводный завод» – Ямало-Ненецкий автономный округ, Приуральский район, пос. Харп, ул. Набережная реки Сось
4. «Лаборатория AquaBioSafe» ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» – 625003, г. Тюмень, ул. Ленина, 25

Аннотация.

Приведены результаты, поставленного на Собском рыбоводном заводе (пос. Харп, ЯНАО), производственного эксперимента с молодь муксуна *Coregonus*. Целью эксперимента, как важного элемента в компенсационном мероприятии по воспроизводству ценных видов рыб, являлось повышение биопотенциала молоди для ее выпуска в Обь. В течение нескольких суток до вылупления эмбрионы были обработаны сверхслабыми импульсными магнитными полями в определенном частотном диапазоне. В постэмбриональный период контрольная и подопытная молодь муксуна была исследована с применением морфометрических и цитолого-гистологических методов. Установлено, что подопытная молодь, в течение всего периода подращивания, превышала контрольную по большинству параметров, и перед выпуском в Обь на нагул масса подопытных мальков муксуна значительно превышала массу контрольной молоди. При оценке характера и степени связи морфометрических параметров с использованием кластерного анализа показано, что ко времени завершения эксперимента более высокая корреляция между признаками отмечалась у подопытной молоди, что является дополнительным подтверждением ее повышенной сбалансированности в процессе развития. Уровень формирования половых желез репродуктивной системы у подопытных особей также превышал развитие гонад контрольных – по размерам и темпу половой дифференциации, числу и цитометрическим показателям половых клеток. Полученные данные позволяют считать целесообразным применять данный подход в практике компенсационного рыбоводства.

Ключевые слова:

муksун, постэмбриональное развитие, аквакультура, морфометрия, гистология, репродуктивная система, сверхслабые импульсные магнитные поля (ССИМП)

Для цитирования:

Селюкова С.А., Пищенко Е.В., Ефремова Е.В., Мирзабаев Д.А., Селюков А.Г. Повышение биопотенциала молоди муксуна *Coregonus muksun* сверхслабыми импульсными магнитными полями в условиях рыбоводного хозяйства // Рыбное хозяйство. 2023. № 6. С.127-134 DOI: 10.37663/0131-6184-2023-6-127-134 EDN rtvuzn

INCREASING THE BIOPOTENTIAL OF COREGONUS MUKSUN BY ULTRA-WEAK PULSE MAGNETIC FIELDS IN FISH FARMING CONDITIONS

Svetlana A. Selyukova – postgraduate student of the Tyumen State University (TSU), @seliukovasvet@yandex.ru, Tyumen, Russia;
Elena V. Pishchenko – Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor of the Department of Biology, Bioresources and Aquaculture, Novosibirsk State Agrarian University (NGAU), @epishenko@ngs.ru, Novosibirsk, Russia;
Ekaterina V. Efremova – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory, NPO Sobsky Fish Hatchery LLC, @katerinaef@yandex.ru, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, village Harp, Russia;
Dmitry A. Mirzabaev – master's student of the Tyumen State University (TSU), @dmitriy08m@gmail.com, Tyumen, Russia;
Alexander G. Selyukov – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Zoology and Evolutionary Ecology of Animals, Tyumen State University (TSU), @ags-bios@yandex.ru, Tyumen, Russia

Addresses:

1. Tyumen State University – 6 Volodarsky str., Tyumen, 625003
2. Novosibirsk State Agrarian University – 630039, Novosibirsk, Dobrolyubova str., 160
3. NPO Sobsky Fish Hatchery LLC – Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Priuralsky district, village. Harp, Embankment of the river Sob
4. "AquaBioSafe Laboratory" Tyumen State University 625003, Tyumen, Lenin str., 25

Annotation. The results of a production experiment with juvenile muksun carried out at the Sob fish hatchery (Kharp village, Yamal-Nenets Autonomous Okrug) are presented. The purpose of the experiment, as an important element in the compensatory measure for the reproduction of valuable fish species, was to increase the biopotential of juveniles for their release into the Ob. For several days before hatching, the embryos were treated with ultra-weak pulsed magnetic fields in a specific frequency range. In the postembryonic period, control and experimental muksun juveniles were studied using morphometric and cytological-histological methods. It was established that the experimental juveniles during the entire growing period exceeded the control ones in most parameters, and before release into the Ob River for feeding, the weight of the experimental muksun fry significantly exceeded the weight of the control juveniles. When assessing the nature and degree of connection between morphometric parameters using cluster analysis, it was shown that by the time the experiment was completed, a higher correlation between traits was observed in the experimental juveniles, which is additional confirmation of its increased balance in the development process. The level of formation of the gonads of the reproductive system in the experimental individuals also exceeded the development of the gonads of the control ones - in terms of size and rate of sexual differentiation, number and cytometric indicators of germ cells. The data obtained allow us to consider it advisable to apply this approach in the practice of compensatory fish farming.

Keywords:

muksun, postembryonic development, aquaculture, morphometry, histology, reproductive system, ultra-weak pulsed magnetic fields (USMPF)

For citation:

Selyukova S.A., Pishchenko E.V., Efremova E.V., Mirzabaev D.A., Selyukov A.G. Increasing the biopotential of juvenile muksun *Coregonus muksun* by ultra-weak pulsed magnetic fields in fish farming conditions // Fisheries. 2023. No. 6. Pp. 127-134 DOI: 10.37663/0131-6184-2023-6-127-134 EDN rtvuzn

В современных условиях экстремального антропогенного воздействия на северные гидросистемы у высокочувствительных к загрязнениям сиговых рыб подавляются естественные механизмы аутореабилитации, что обусловлено аккумуляцией токсикантов [3; 4; 8; 10-12]. Возрастающая хромосомная мутабельность этих видов в Обь-Иртышском бассейне [7] ведет к накоплению цитоморфологических аномалий, сопровождающихся в постэмбриональный период уродствами и гибелью молоди. Все эти явления, в конечном итоге, ведут к деградации генофондов и сокращению видовой численности.

Одним из наиболее ценных представителей сиговых рыб северных водоемов является муксун, численность которого в Обском бассейне в последние

30-40 лет многократно снизилась. Факторами риска в современных экстремальных условиях, ведущих к сокращению популяции обского муксуна, отчасти являются природные факторы: позднее половое созревание и пропуск очередного нереста – 2-х и 3-х летние половые циклы [1; 2; 10; 12], но в определяющей степени – антропогенные. Наиболее критический из них – браконьерство [6], также важную роль в снижении запасов вызывают загрязнения вод, перегораживание русел рек трубопроводами и, соответственно, изменение путей миграций и т.д.

Принимаются меры по сокращению антропогенного давления на природные популяции обского муксуна: запрет Минсельхоза (2015 г.) на его вылов в ЯНАО, ХМАО и Томской области, работы рыбоводных заводов в ЯНАО (Собский р/з), ХМАО (Югор-

ский р/з) и ряда более мелких организаций, принимающих участие в реализации компенсационных мероприятий. Этот тип рыбоводного хозяйства является вынужденной мерой, которая направлена на восстановление численности и поддержание в природных условиях, на приемлемом уровне, ценных объектов ихтиофауны – осетровых, лососевых, сиговых и др. Однако в отношении ценных видов сиговых рыб (нельма, муксун) такие меры пока не привели к ощутимому результату: достоверно установленному повышению промвозврата. Для повышения эффективности проводимых работ по увеличению численности муксуна необходимо изыскивать новые технологические методы.

В качестве одного из них может быть предложен подход, ранее апробированный на чире в условиях УЗВ Собского рыбозавода [14; 15]. Было отмечено благотворное влияние применения сверхслабых импульсных магнитных полей (ССИМП) на рост особей и развитие репродуктивной системы этого вида для компенсационного рыбоводства.

Цель настоящего исследования состояла в морфометрической и цито-гистологической оценке влияния генерируемых техническим устройством сверхслабых импульсных магнитных полей на

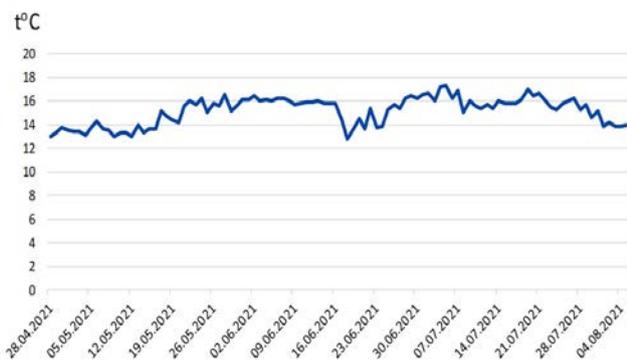


Рисунок 1. Динамика температур в бассейнах Собского рыбозавода (2021 г.)

Figure 1. Temperature dynamics in the basins of the Sobsky Fish Hatchery (2021)

морфологические и репродуктивные характеристики молоди муксуна, подращиваемой в условиях УЗВ Собского рыбоводного завода.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В апреле-августе 2021 г. на базе Собского рыбозавода был поставлен производственный эксперимент с зародышами и молодь муксуна собственного маточного стада. С использованием аппаратного комплекса «Т-102П», генерирующего сверхслабые импульсные магнитные поля, в аппаратах Вейса была проведена обработка¹ партии (8,1 млн экз.) эмбрионов муксуна на 26 стадии (вылупление).

После вылупления предличинки были высажены в бассейны. Необработанные предличинки муксуна (контроль) были помещены в аналогичные ёмкости. В течение 28 суток молодь кормили метанауплиусами артемии с постепенным снижением их доли в рационе и одновременным повышением доли гранулированных кормов фирмы «Скреттинг» (Gemma Wean и Nutra HP), которые начали вводить в рацион на 3 сутки постэмбриогенеза. Питательность используемого корма и размер гранул подбирали в соответствии со средней массой растущих рыб (табл. 1). Кратность кормления составляла от 12 до 20 раз в сутки с постепенным увеличением кратности и количества сухого корма.

Температура воды в бассейнах с подращиваемой молодь на протяжении всего эксперимента варьировала в пределах 13...17°C (рис. 1), гидрорхимический режим приведен в таблице (табл. 2).

Для морфометрического анализа молодь контрольной и опытной партий в возрасте 25, 45, 58 и 83 суток фиксировали в 4% формалине. В возрасте 85 сут. подращенная молодь муксуна была выпущена в Обь. Морфометрию мальков (25 сут.) характеризовали по следующим признакам: L1 – длина тела до конца хорды; AA – антеанальное расстояние; Н – наибольшая высота тела; lс – длина головы; hс – высота головы; dо – диаметр глаза.

У молоди в возрасте 44 сут и старше к этим параметрам добавляли промеры наименьшей высоты тела (h) и взвешивание (Р). Для промеров использовали бинокуляр МБС-10, взвешивали молодь на электронных весах АЖ320 (0,001 г).

Таблица 1. Размер гранул и питательная ценность используемых кормов /

Table 1. Granule size and nutritional value of the feed used

Дата	Размер гранул, мм	Питательная ценность		
		Белок, %	Жир, %	Перевариваемая энергия, МДж/кг
28.04-30.04	артемия (науплии)			
01.05.-24.05	смесь 0,1 - 0,2	62	14	20,0
25.05-08.06	смесь 0,2 - 0,3	57-62	14-17	20,0
09.06-16.06	0,3	57	17	20,0
17.06-07.07	смесь 0,3 - 0,5	55-57	17-18	20,0-20,2
08.07-21.07	смесь 0,5 - 0,7	55	18	20,2
22.07-05.08	смесь 0,7 - 1,0	55	18	20,2

¹ Обработку эмбрионов чира проводили В.П. Елькин, А.Н. Самсонов и А.Г. Селюков под общим руководством А.И. Солодилова (ООО «Телос-Сибирь») с применением технической системы, разработанной для медико-биологических работ [16]; частотный диапазон находился в пределах 0,1-10 МГц, напряженность магнитного поля не превышала 0,025 нТл.

Таблица 2. Гидрохимические показатели в бассейнах с подращиваемой молодь муксуна (2020) / **Table 2.** Hydrochemical indicators in basins with reared muksun juveniles (2020)

Дата	NH ₄ ⁺ , мг/л	NO ₂ ⁻ , мг/л	NO ₃ ⁻ , мг/л	Минерализация, мг/л	pH
28.04-11.05	0,07±0,01	0,003±0,0005	0,43±0,03	144±16,4	7,66±0,02
12.05-25.05	0,14±0,01	0,005±0,0006	1,5±0,23	359±16,5	7,21±0,06
26.05-08.06	0,13±0,01	0,01±0,0007	2,44±0,25	640±15,7	7,28±0,02
09.06-22.06	0,15±0,02	0,006±0,0008	1,33±0,07	465±40,01	7,23±0,03
23.06-06.07	0,13±0,01	0,005±0,001	1,5±0,108	333±16,7	7,29±0,03
07.07-20.07	0,22±0,01	0,012±0,002	1,73±0,19	252±8,81	7,22±0,02
21.07-05.08	0,28±0,01	0,038±0,003	1,72±0,22	252±25,25	7,08±0,02

Морфометрия была выполнена на 81 экз. контрольной и 87 – экспериментальной партий муксуна. Дистанцию расстояний между признаками у молоди контрольной и опытной партий оценивали с помощью кластерного анализа с использованием двухсвязного парно-группового метода в метрике «1 – Пирсон r» пакета STATISTICA (StatSoft, Inc. V12).

Для гистологического анализа контрольная и подопытная молодь в 25, 45, 57 (опыт), 59 (контроль) и 83 сут. были зафиксированы в смеси Бродского. Изготовление гистологических препаратов осуществляли с использованием стандартных гистологических методик [5]. Отпрепарированные внутренние органы молоди, проведенные через спирты возрастающей концентрации, хлороформ и хлороформ-парафин, заливали в парафин на станции ЕС 350-2 («Microm»). Парафиновые срезы внутренних органов с гонадами толщиной 5 мкм во фронтальной проекции изготавливали на ротационном микротоме HM 355S («Microm»). Препараты окрашивали железным гематоксилином по Гейденгайну с докраской эозином [9]

и с последующим заключением в среду Витрогель («BioVitrum»). На микроскопе «AxioImager A1» («Zeiss») через видеокамеру AxioCam MRc5, с использованием программы AxioVision Release 4.7.1 («Zeiss»), препараты фотографировали при увеличении: окуляр 10x, объектив 100x.

На фронтальных срезах половой железы измеряли максимальный и минимальный размеры, рассчитывали площадь; подсчитывали число половых клеток и ядрышек, измеряли максимальный и минимальный диаметры клеток и их ядер с последующим усреднением. Всего, с применением методов цитолого-гистологического анализа, нами была исследована 61 разновозрастная особь муксуна: 30 контрольных и 31 подопытная. Статистические расчеты проводили с использованием электронных таблиц MS Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Морфометрический анализ

В течение подращивания молоди муксуна из обеих партий были получены следующие морфометри-

Таблица 3. Морфометрия муксуна контрольной и опытной партий в условиях Собского рыбозавода (июнь-август, 2021 г.) / **Table 3.** Morphometry of muksun of the control and experimental groups in the conditions of the Sobsky fish hatchery (June-August, 2021)

Параметры, мм	25 сут (08.06)		45 сут (28.06)		58 сут (11.07)		83 сут (05.08)	
	Контроль (18 экз.)	Опыт (24 экз.)	Контроль (20 экз.)	Опыт (20 экз.)	Контроль (20 экз.)	Опыт (20 экз.)	Контроль (23 экз.)	Опыт (23 экз.)
	$\bar{X} \pm S\bar{x}$ min-max							
L1	15,9 ± 0,73 11,0 – 23,3	18,0 ± 0,40** 14,4 – 22,1	27,8 ± 1,34 18,8 – 40,6	29,6 ± 0,44 27,1 – 32,7	30,4 ± 0,81 25,3 – 36,7	32,6 ± 0,85* 25,4 – 40,5	48,4 ± 1,03 37,7 – 57,8	52,1 ± 1,34** 42,6 – 70,3
AA	12,1 ± 0,49 9,2 – 17,7	13,1 ± 0,35 9,6 – 16,9	20,0 ± 0,96 11,5 – 28,1	21,3 ± 0,36 19,0 – 24,4	22,2 ± 0,56 18,4 – 26,8	23,4 ± 0,54 18,7 – 28,1	35,0 ± 0,71 27,0 – 41,9	37,6 ± 0,97** 30,2 – 50,4
H	1,9 ± 0,20 1,3 – 3,8	2,1 ± 0,12 1,0 – 3,6	5,3 ± 0,28 3,1 – 7,5	6,2 ± 0,13** 5,4 – 7,3	5,7 ± 0,18 4,6 – 7,2	6,6 ± 0,17** 5,2 – 8,3	9,1 ± 0,21 6,9 – 11,0	10,7 ± 0,33** 8,7 – 14,8
h	-	-	2,0 ± 0,13 1,0 – 3,1	2,7 ± 0,08** 2,1 – 3,3	2,3 ± 0,07 1,9 – 2,9	2,4 ± 0,07 1,9 – 10,0	3,6 ± 0,09 2,6 – 4,2	4,1 ± 0,13** 3,0 – 5,2
lc	4,0 ± 0,16 2,9 – 5,8	4,4 ± 0,13* 3,3 – 5,8	7,0 ± 0,40 4,2 – 10	7,3 ± 0,15 5,8 – 8,3	8,1 ± 0,19 6,8 – 10,0	8,5 ± 0,20 7,1 – 9,7	12,5 ± 0,20 10,8 – 14,5	12,7 ± 0,30 11,0 – 17,4
hc	3,2 ± 0,09 2,7 – 4,2	3,0 ± 0,08 2,1 – 4,0	4,9 ± 0,22 3,1 – 6,3	5,4 ± 0,11* 4,4 – 6,3	5,0 ± 0,15 4,1 – 6,2	5,6 ± 0,16** 4,5 – 6,7	8,1 ± 0,14 6,6 – 9,1	8,6 ± 0,20** 7,0 – 10,8
do	1,4 ± 0,04 1,3 – 1,9	1,5 ± 0,04 1,0 – 1,9	2,4 ± 0,10 1,6 – 3,1	2,4 ± 0,05 2,1 – 2,9	2,6 ± 0,06 2,2 – 3,0	2,7 ± 0,05 2,3 – 3,2	3,7 ± 0,06 2,9 – 4,2	3,9 ± 0,07** 3,2 – 4,6
P, r	-	-	0,25 ± 0,04 0,1 – 0,6	0,31 ± 0,01 0,2 – 0,5	0,37 ± 0,03 0,2 – 0,6	0,46 ± 0,03** 0,2 – 0,8	1,37 ± 0,08 0,6 – 2,1	2,06 ± 0,17** 1,1 – 4,6

Примечание: * – достоверные различия на первом уровне значимости (p<0,05)
** – достоверные различия на втором уровне значимости (p<0,01)

ческие и весовые характеристики (табл. 3). В возрасте 25 сут. из 6 параметров по всем, кроме высоты головы (hc), отмечено преобладание подопытных особей над контрольными, а по двум – длине тела и длине головы – различия оказались достоверными. В возрасте 45 сут. также большинство показателей молодежи опытной партии превосходило соответствующие параметры контрольной, а по высотам тела и головы превышение было достоверным (табл. 3). Тенденция увеличения значений морфологических параметров экспериментальной молодежи над всеми параметрами контрольных особей сохранилась и в 58-суточном возрасте. В июле и августе у молодежи отмечался интенсивный рост и в еще большей степени отмечено расхождение параметров подопытных и контрольных особей. За исключением длины головы (lc), все показатели сеголеток опытной партии высокодостоверно превышали таковые у контрольной молодежи (табл. 3). В возрасте 85 сут. молодежь муксуна была выпущена на нагул в Обь.

Далее охарактеризуем скоррелированность морфологических параметров у исследуемых особей муксуна контрольной и опытной партий. У молодежи контрольной партии в возрасте 25 сут. (рис. 2 а) отчетливо проявилась высокая связь длины тела с антеанальным расстоянием (AA) и длиной головы ($r > 0,9$), тогда как у подопытной молодежи в это время тесная связь ($r > 0,9$) была отмечена только для L1-AA (рис. 2 б).

Еще более высокая корреляция между параметрами у контрольной партии отмечена в возрасте 45 сут. (рис. 2 в). Большинство параметров были тесно связаны ($r > 0,9$); в опытной партии тесная связь ($r > 0,9$) по-прежнему отмечена лишь для L1-AA, а остальные параметры имеют между собой только среднюю и слабую связи (рис. 2 г).

По мере дальнейшего развития (58 сут.) контрольная партия муксуна, как и ранее имела столь же тесно скоррелированные параметры: $r > 0,7...0,9$ (рис. 3 а). Но и в опытной партии проявилось увеличение степени скоррелированности (рис. 3 б). Перед выпуском молодежи муксуна в Обь на нагул (83 сут.) отмечена тенденция снижения корреляции параметров у контрольной партии (рис. 3 в), тогда как большинство признаков у сеголеток в опыте были высокоскоррелированы: $r > 0,9$ (рис. 3 г).

Таким образом, подопытная молодежь муксуна, в условиях УЗВ рыбоводного завода, характеризовалась большими, по сравнению с контрольной, значениями изучаемых показателей, а при завершении подращивания у нее происходила смена аллометрического роста изометрическим.

Гистологический анализ

Развитие репродуктивной системы у молодежи проследили с 45-суточного возраста. В это время размеры гонад подопытных особей превосходили развитие половых желез у контрольных. При этом количество половых клеток на 1 фронтальном срезе у контрольных особей оказалось больше. Редко встречающиеся клетки были представлены гониями (рис. 4 а, б), количество ядрышек в их ядрах варьировало от 1 до 5 (табл. 4). В возрасте 57-59 сут. состояние гонад у молодежи муксуна из обеих партий

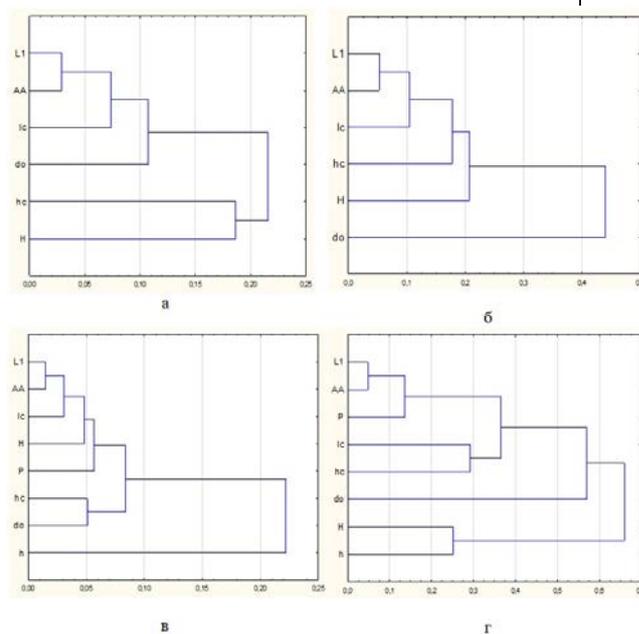


Рисунок 2. Кластерный анализ (1- r) морфологических параметров молодежи муксуна в возрасте 25 (а, б) и 45 (в, г) суток; а, в – контроль; б, г – опыт

Figure 2. Cluster analysis (1- r) of morphological parameters of juvenile muksun at the age of 25 (a, b) and 45 (c, d) days; a, c – control; b, d – experiment

почти не изменилось, однако размеры гонад контрольных были немного больше, чем у подопытных. Возможно, этот факт является отражением начала глубоких качественных преобразований, на которые отвлекаются ресурсы организма, т.к. у будущих

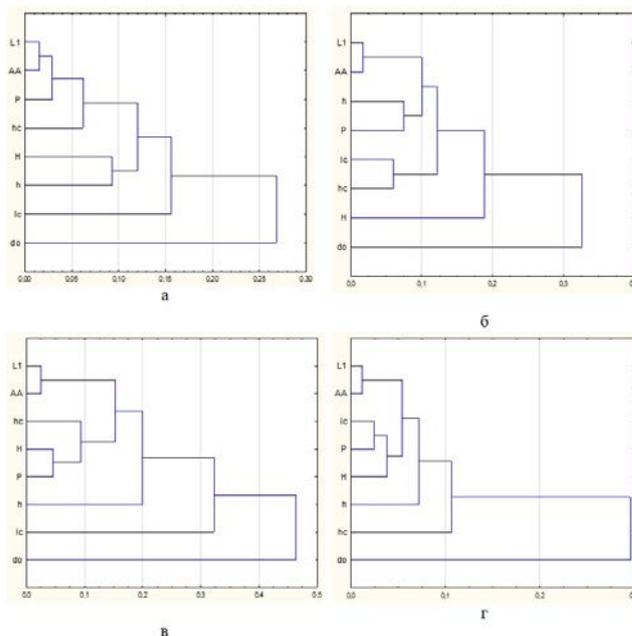


Рисунок 3. Кластерный анализ (1- r) морфологических параметров молодежи муксуна в возрасте 58 (а, б) и 83 (в, г) суток; а, в – контроль; б, г – опыт

Figure 3. Cluster analysis (1- r) of morphological parameters of juvenile muksun at the age of 58 (a, б) and 83 (c, d) days; a, c – control; b, d – experiment

самок опытной партии начинается локализация оогоний в латеральной области половой железы, что свидетельствует о начале дифференцировки пола (рис. 4 з). В формирующихся семенниках подобное расположение гониев отсутствует (рис. 4 в).

Значительные различия в состоянии воспроизводительной системы у контрольной и подопытной молодежи муксуна проявились (рис. 5) перед ее выпуском в Обь (83 сут.). У сеголеток контрольной партии развитие гонад почти не изменилось (рис. 5 а, б). В отличие от них, в более крупных ($p < 0,05$) гонадах особей в опыте (табл. 4) проходила анатомическая дифференцировка яичников (рис. 5 в, г), а число оогоний было достоверно выше ($p < 0,05$). Размеры их ядер и число ядрышек также достоверно ($p < 0,01$) превышали эти показатели у контрольных особей (табл. 4).

Таким образом, в постэмбриональном онтогенезе молодь муксуна, обработанная ССИМП перед вылуплением, преобладая по морфологическим параметрам над контрольной, но отставая по степени их скоррелированности, уже к 3-месячному возрасту переходила к изометрическому росту. Она характеризуется и более высоким темпом развития генеративной системы: в течение почти всего исследуемого периода размеры гонад пре-

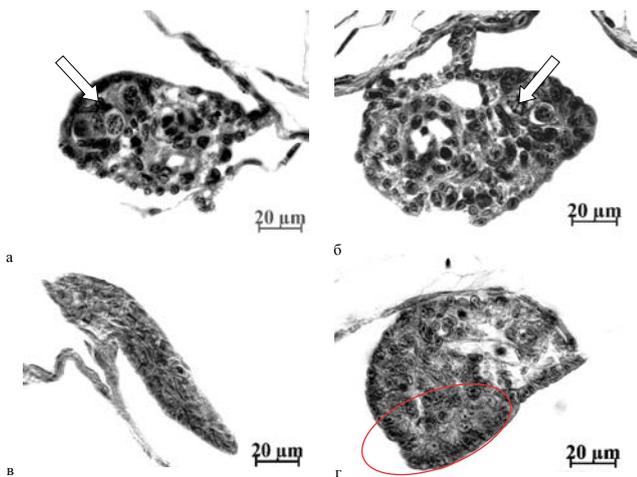


Рисунок 4. Состояние гонад молодежи муксуна контрольной и опытной партий: а (контроль), б (опыт) – на срезах гонад просматриваются гонимальные клетки (стрелки); возраст 45 сут; в (контроль) – формирование будущего семенника; возраст 59 сут; г (опыт) – на латеральной стороне формирующегося яичника локализуется группа оогоний (выделенный участок); возраст 57 сут. Краситель: железный гематоксилин по Гейденгайну с докраской эозином.

Figure 4. State of the gonads of juvenile muksun of the control and experimental groups: a (control), b (experiment) – gonial cells are visible on sections of gonads (arrows); age 45 days; c (control) – formation of the future testis; age 59 days; d (experiment) – a group of oogonia is localized on the lateral side of the developing ovary (selected area); age 57 days. The iron hematoxylin by Heidenhain with eosin staining.

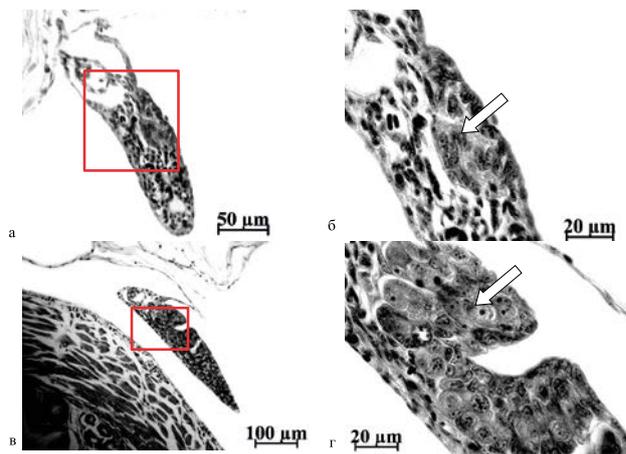


Рисунок 5. Гонады контрольных (а, б) и подопытных (в, г) сеголеток муксуна (83 суток). В гонаде контрольной (а) особи муксуна выделен участок, в котором на латеральной поверхности (б) выявляется область концентрации гоний (стрелка); В формирующемся яичнике (в) подопытной самки образуется борозда – проходит анатомическая дифференцировка; г – стрелка указывает на оогонии, концентрирующиеся в области инвагинации герминативного эпителия. Краситель: железный гематоксилин по Гейденгайну с докраской эозином.

Figure 5. Gonads of control (a, b) and experimental (c, d) young of the year muksun (83 days). In the gonad of the control (a) muksun individual, a section was identified in which on the lateral surface (b) an area of concentration of gonial cells is detected (arrow); In the developing ovary (c) of the experimental female, a groove is formed – anatomical differentiation takes place; d – arrow points to oogonia concentrated in the area of invagination of the germinal epithelium. The iron hematoxylin by Heidenhain with eosin staining.

восходили этот показатель у контрольных особей, увеличивалось число гонимальных клеток, проходила анатомическая дифференцировка гонад – в развивающихся яичниках подопытной молодежи уже формировались яйценосные пластинки, что не отмечали у молодежи контрольной партии.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное исследование контрольной и обработанной сверхслабыми импульсными магнитными полями эмбрионов муксуна на завершающей стадии эмбриогенеза, в условиях производственного эксперимента (СРЗ, Харп, ЯНАО), показало устойчивые различия морфологических показателей и репродуктивного развития. Установленные более высокие значения морфологических параметров у подопытной молодежи муксуна диссоциируют с их низкой скоррелированностью, которая может проявляться или вследствие медленного развития и роста, или, скорее всего, более интенсивного роста, при котором одни параметры развиваются с опережением других, отчего проявляется некоторая несогласованность в ростовых характеристиках – аллометрический рост. Однако по мере дальнейшего развития, при сохраняющемся более высоком темпе роста, происходит вы-

Таблица 4. Репродуктивные показатели молоди муксуна в условиях Собского рыбозавода (июнь-август, 2021 г.) / **Table 4.** Reproductive indicators of juvenile muksun in the conditions of the Sobsky fish hatchery (June-August, 2021)

Возраст (дата)	45 сут (28.06)		59 сут (12.07)		57 сут (10.07)		83 сут (5.08)	
Параметры гонад (на фронтальном срезе)								
Показатели	Контроль (n = 46)	Опыт (n = 62)	Контроль (n = 52)	Опыт (n = 43)	Контроль (n = 39)	Опыт (n = 36)		
	$\bar{X} \pm Sx$ min-max	$\bar{X} \pm Sx$ min-max	$\bar{X} \pm Sx$ min-max	$\bar{X} \pm Sx$ min-max	$\bar{X} \pm Sx$ min-max	$\bar{X} \pm Sx$ min-max	$\bar{X} \pm Sx$ min-max	$\bar{X} \pm Sx$ min-max
Длина, мкм	98,8 ± 5,8 58,3 - 211,7	103,3 ± 5,87 38 - 267,1	136,6 ± 4,5 66,9 - 219,8	119,1 ± 4,7 73,4 - 184,9	185,2 ± 9,25 89 - 295,5	198,4 ± 18,79 70,2 - 462,7		
Ширина, мкм	38,8 ± 2,25 22 - 90,8	44,4 ± 1,82 23,9 - 75,3	41,1 ± 2,16 14,6 - 71,1	51,1 ± 2,62 26,9 - 85,6	52,8 ± 5,21 24,7 - 204,2	61,5 ± 4,28 18,0 - 120,9		
Площадь, мкм ²	2910,7 ± 331,6 1218,8 - 12851	3666,0 ± 269,9* 677,2 - 13089,6	4516,9 ± 336,4 1215,1 - 9171,3	4441,4 ± 175,9 2238,5 - 7059	7485,2 ± 930,3 1847,7 - 37786	10607,3 ± 1516,9* 1690,8 - 39326,1		
Половые клетки (на фронтальном срезе)								
Показатели	Контроль (n = 64)	Опыт (n = 93)	Контроль (n = 91)	Опыт (n = 77)	Контроль (n = 82)	Опыт (n = 79)		
	$0,87 \pm 0,08^*$ 0 - 3	$0,69 \pm 0,06$ 0 - 3	$1,03 \pm 0,07$ 0 - 3	$1,20 \pm 0,08$ 0 - 4	$1,98 \pm 0,18$ 0 - 12	$2,59 \pm 0,28^*$ 0 - 14		
Диаметр клетки, мкм	$10,5 \pm 0,22$ 7,0 - 16,4	$10,1 \pm 0,17$ 6,4 - 14,8	$8,6 \pm 0,19$ 5,3 - 13,9	$9,8 \pm 0,18^{**}$ 7,4 - 16,1	$9,6 \pm 0,13$ 7,2 - 12,4	$10,2 \pm 0,20^{**}$ 6,8 - 15,7		
Диаметр ядра, мкм	$6,3 \pm 0,19$ 3,0 - 9,2	$6,0 \pm 0,15$ 3,1 - 10,2	$5,4 \pm 0,14$ 3,1 - 9,8	$5,5 \pm 0,13$ 3,6 - 9,8	$5,5 \pm 0,11$ 3,7 - 8,8	$6,1 \pm 0,16^{**}$ 3,9 - 10,5		
Число ядрышек	$2,0 \pm 0,08^*$ 1,0 - 3,0	$1,8 \pm 0,08$ 1,0 - 5,0	$1,4 \pm 0,07$ 1,0 - 4,0	$1,5 \pm 0,08$ 1,0 - 4,0	$1,5 \pm 0,07$ 1,0 - 3,0	$2,1 \pm 0,12^{**}$ 1,0 - 5,0		

Примечание: по каждой дате в контроле и опыте было исследовано по 10 особей, кроме подопытных в 57 сут (11 экз.).

* - $p < 0,05$, ** - $p < 0,01$

равнивание показателей и их скоррелированность повышается – наблюдается изометрический рост. Можно полагать, что и остальные морфофункциональные показатели приходят в норму, что особенно важно при смене условий искусственного содержания на природные.

При исследовании состояния репродуктивной системы контрольной и подопытной молоди в возрасте 45 сут. отмечено, что при более крупных гонадах у подопытных мальков количество гониальных клеток в среднем меньше, чем у контрольных. Это явление может быть вызвано некоторой задержкой гаметогенеза, когда соматическая часть гонады по-прежнему увеличивается. Однако в дальнейшем начинается и всё более возрастает компенсаторное развитие репродуктивной системы, что выражается в значительно более развитых гонадах у подопытных особей.

Известно, что повышение числа первичных гоноцитов и, соответственно, гониальных клеток инициирует развитие половых зачатков в направлении яичников. В ряде работ [18; 19] показана прямая связь дифференцировки гонад по типу яичников от числа, заселяющихся в герминативные валики, первичных гоноцитов. И, напротив, если по каким-то причинам в формирующуюся гонаду не мигрируют первичные половые клетки, то в ней продолжается синтез андрогенов и происходит дифференцировка в семенник [17].

Отмеченное нами ранее, на обработанной ССИМП молоди чира, более интенсивное развитие гонад, увеличение числа первичных половых клеток и начало цитологической дифференцировки пола по

женскому типу [15] согласуется с полученными данными и на подопытной молоди муксуна. Отсутствие у исследуемых сеголеток муксуна цитологической дифференцировки пола является результатом более медленного развития его репродуктивной системы [13], однако тенденция в ускорении генеративного развития отчетливо просматривается.

При этом вновь отметим, что проведение обработки ССИМП в конце эмбриогенеза, когда процессы эмбрионального формообразования уже завершились, может вести лишь к ускорению роста и развития [14; 15]. Нормализовать развитие, активизировать адаптационный потенциал для повышения выживаемости и расширить экологическую пластичность развивающегося организма можно при проведении соответствующих мероприятий на начальных стадиях онтогенеза – с гаметами и ранними зародышами.

Финансирование. Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Правительства Тюменской области в рамках проекта Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра Проект №89-ДОН (2).

Financing. The research was carried out with partial financial support from the Government of the Tyumen Region within the framework of the project of the West Siberian Interregional Scientific and Educational Center Project No. 89-DON (2).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов в работу: Селюкова С.А. – сбор и анализ данных, подготовка статьи; Пищенко Е.В. – идея работы, окончательная проверка статьи; Ефремова Е.В. – сбор и анализ данных; Мирзабаев Д.А. – сбор и анализ данных; Селюков А.Г. – идея работы, подготовка статьи.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution to the work: **Selyukova S.A.** – data collection and analysis, preparation of the article; **Pishchenko E.V.** – idea of the work, final verification of the article; **Efremova E.V.** – data collection and analysis; **Mirzabaev D.A.** – data collection and analysis; **Selyukov A.G.** – idea of the work, preparation of the article.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

- Исаков П.В., Селюков А.Г. Состояние яичников и особенности овариальных циклов муксуна *Coregonus muksun* (*Coregonidae*, *Salmoniformes*) в период зимовки в Обской губе // Вопросы ихтиологии. 2005. Т.45. №2. С.242-250.
- Исаков П.В., Селюков А.Г. Сиговые рыбы в экосистеме Обской губы. Монография / Тюмень: ТюмГУ. 2010. 184 с.
- Лукин А.А. Система воспроизводства сига *Coregonus lavaretus* в условиях многофакторного загрязнения // Вопросы ихтиологии. 2000. Т.40. № 3. С.425-428.
- Лукин А.А., Шарова Ю.Н. Патологии микроструктуры генеративных органов самок сига *Coregonus lavaretus* оз. Имандра // Вопросы ихтиологии. 2002. Т.42. № 1. С.114-120.
- Микодина Е.В., Седова М.А., Чмилевский Д.А. [и др.] Гистология для ихтиологов: Опыт и советы. М.: ВНИРО. 2009. 112 с.
- Матковский А.К. Основные закономерности динамики численности муксуна *Coregonus muksun* реки Обь // Вопросы рыболовства. 2006. Т.7. № 3(27). С. 505-521.
- Пак И.В., Моисеенко Т.И., Сергиенко Л.Л. [и др.] Изменчивость цитогенетических показателей сиговых рыб Обь-Иртышского бассейна // Экология. 2013. №4. С. 310-312.
- Решетников Ю.С., Попова О.А., Кашулин Н.А. [и др.] Оценка благополучия рыбной части водного сообщества по результатам морфопатологического анализа рыб // Успехи современной биологии. 1999. Т.119. №2. С. 165-177.
- Ромейс Б. Микроскопическая техника. М.:Издательство иностранной литературы, 1953. 718 с.
- Селюков А.Г. Репродуктивная система сиговых рыб (*Coregonidae*, *Salmoniformes*) как индикатор состояния экосистемы Оби. II. Половые циклы муксуна *Coregonus muksun* // Вопросы ихтиологии. 2002. Т. 42. №2. С. 225-235.
- Селюков А.Г. Морфофункциональный статус рыб Обь-Иртышского бассейна в современных условиях. Тюмень: ТюмГУ. 2007. 184 с.
- Селюков А.Г. Морфофункциональные изменения рыб бассейна Средней и Нижней Оби в условиях возрастающего антропогенного влияния // Вопросы ихтиологии.— 2012. Т. 52. №5. С. 581-600.
- Селюков А.Г., А.А. Боданова, С.А. Селюкова Ранний гаметогенез сиговых рыб в аквакультуре за пределами естественного ареала. II. Гаметогенез и формирование фонда половых клеток у сеголеток чира и муксуна // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2019. № 12(167). С. 62-70.
- Селюков А.Г., Ефремова Е.В., Селюкова С.А., Шуман Л.А. Проблемы компенсационного рыбоводства: повышение адаптационного потенциала чира *Coregonus nasus* (Pallas) в раннем онтогенезе слабыми магнитными полями. 1. Морфометрический анализ // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2020 а. № 11. С. 32-46.
- Селюков А.Г., Селюкова С.А., Шуман Л.А., Ефремова Е.В. Проблемы компенсационного рыбоводства: повышение адаптационного потенциала чира *Coregonus nasus* (Pallas) в раннем онтогенезе слабыми магнитными полями. 2. Гистологический анализ // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2020 б. № 12. С. 28-40.
- Солодилов А.И. Патент № 2155081. Способ обработки вещества магнитным полем и устройство для его осуществления. М. 2000.
- Ding Y., Lin Z., Qifeng Z., [et al.]. Abundance of early embryonic primordial germ cells promotes zebrafish female differentiation as revealed by lifetime labeling of germline. *Marine Biotechnology*. 2019. 21, Pp.217228.
- Kurokawa H, Saito D, Nakamura S, [et al.]. Germ cells are essential for sexual dimorphism in the medaka gonad. *Proc Nat Acad Sci USA*. 2007. 104, 43. Pp.16958-16963.
- Lewis Z.R., McClellan M.C, Postlethwait J.H, [et al.]. Female-specific increase in primordial germ cells marks sex differentiation in threespine stickleback (*Gasterosteus aculeatus*). *J. Morphol.* 2008. 269, 8. Pp. 909-921.
- Tanaka M, Saito D, Morinaga C, Kurokawa H. Cross talk between germ cells and gonadal somatic cells is critical for sex differentiation of

the gonads in the teleost fish, medaka (*Oryzias latipes*) // *Dev Growth Differ.* 2008. 50, 4. P.273-278.

REFERENCES AND SOURCES

- Isakov P.V., Selyukov A.G. (2005). The state of ovaries and osobennosti of the aquarium species of mucksun (*Coregonidae*, *salmon-like*) in the winter in the Gulf of Ob // *Questions of Philosophy*. Vol.45. No. 2. Pp.242-250. (In Russ).
- Isakov P.V., Selyukov A.G. (2010). Whitefish in the ecosystem of the Gulf of Ob. Monograph / Tyumen: TSU. 184 p. (In Russ).
- Lukin A.A. (2000). *Coregonus lavaretus* whitefish production system in the republic of multi-factor pollution // *Environmental issues*. Vol.40. No. 3. Pp.425-428. (In Russ).
- Lukin A.A., Sharov A.N. (2002). Pathological microstructures of genetic organisms of female whitefish *Coregonus lavaretus* oz. Imandra // *Questions of ichthyology*. Vol.42. No. 1. Pp.114-120. (In Russ).
- Mikodina E.V., Sedova M.A., Chmylevsky D.A. [et al.] (2009). Histology for ichthyologists: Experience and advice. M.: VNIRO. 112 p. (In Russ).
- Matkovsky A.K. (2006). Obvious patterns of the dynamics of the abundance of the mucksun *Coregonus muksun* of the Ob river // *Questions of fisheries*. Vol.7. No. 3(27). Pp. 505-521. (In Russ).
- Pak I.V., Moiseenko T.I., Sergienko L.L. [et al.] (2013). Variability of cytogenetic parameters of whitefish of the Ob-Irtysh basin // *Ecology*. No. 4. Pp. 310-312. (In Russ).
- Reshetnikov Yu.S., Popova O.A., Kashulin N.A. [et al.] (1999). Assessment of the well-being of the fish part of the aquatic community based on the results of morphopathological analysis of fish // *Successes of modern biology*. Vol.119. No.2. Pp. 165-177. (In Russ).
- Romeis B. (1953). Microscopic technique. M.:Publishing House of Foreign Literature. 718 p. (In Russ).
- Selyukov A.G. (2002). Reproductive system of whitefish (*Coregonidae*, *Salmoniformes*) as an indicator of the O. B. II constellation. Mucksun's genitals *Coregonus muksun* // *Questions of philosophy*. Vol. 42. No.2. Pp. 225-235. (In Russ).
- Selyukov A.G. (2007). Morphofunctional status of fishes of the Ob-Irtysh basin in modern conditions. Tyumen: Tyumen State University. 184 p. (In Russ).
- Selyukov A.G. (2012). Morphofunctional changes in fish of the Middle and Lower Ob basin under conditions of increasing anthropogenic influence // *Questions of ichthyology*. Vol. 52. No. 5. Pp. 581-600. (In Russ).
- Selyukov A.G., A.A. Bogdanova, S.A. Selyukova (2019). Early gametogenesis of whitefish in aquaculture outside the natural range. Second. Gametogenesis and formation of the germ cell fund in mucksun and chira fingerlings // *Fish farming and fisheries*. No. 12(167). Pp. 62-70. (In Russ).
- Selyukov A.G., Efremova E.V., Selyukova S.A., Shuman L.A. (2020 a). Problems of compensatory fish farming: increasing the adaptive potential of *Coregonus nasus* (Pallas) in early ontogenesis by weak magnetic fields. 1. Morphometric analysis // *Fish farming and fisheries*. No. 11. Pp. 32-46. (In Russ).
- Selyukov A.G., Selyukova S.A., Shuman L.A., Yefremova E.V. (2020 b). Problems of compensatory fish farming: increasing the adaptive potential of *Coregonus nasus* (Pallas) in early ontogenesis by weak magnetic fields. 2. Histological analysis // *Fish farming and fisheries*. No. 12. Pp. 28-40. (In Russ).
- Solodilov A.I. (2000). Patent No. 2155081. A method of processing a substance with a magnetic field and a device for its implementation. M. 2000.
- Ding Y., Lin Z., Qifeng Z., [et al.]. Abundance of early embryonic primordial germ cells promotes zebrafish female differentiation as revealed by lifetime labeling of germline. *Marine Biotechnology*. 2019. 21, Pp.217228.
- Kurokawa H, Saito D, Nakamura S, [et al.]. Germ cells are essential for sexual dimorphism in the gonads of the medaka. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 104, 43. Pp.16958-16963.
- Lewis Z.R., McClellan M.S., Postlethwait J.H. [et al.]. (2008). Female-specific increase in primary germ cells marks sexual differentiation in the three-walled stickleback (*Gasterosteus aculeatus*). *J. Morphol.* 269, 8. Pp. 909-921.
- Tanaka M., Saito D., Morinaga S., Kurokawa H. (2008). The cross-current between germ cells and somatic gonad cells is crucial for the sexual differentiation of gonads in bony medaka fish (*Oryzias latipes*) // *Dev Growth Difference*. 50, 4. Pp.273-278.

Материал поступил в редакцию / Received 29.09.2023
Принят к публикации / Accepted for publication 25.10.2023